

## Bimodális koromrészecske-méreteloszlások kialakulása és kezelése szénhidrogének égése során

ALKALMAZOTT TERMÉSZETTUDOMÁNYI INTÉZET

*számítógépes szimuláció, szénhidrogének égése, koromképződés*

### Bevezetés

Az égés a legkorábban felismert és felhasznált kémiai folyamatok egyike. Konkrét jelentőségén túlmenően gyakran volt általános, tudománytörténeti fontosságú felfedezések, így a tömegmegmaradás törvénye felismerésének (Lomonoszov 1748, Lavoisier, 1789) és a flogiszon-elmélet megdöntésének (Lavoisier, 1789) kiindulópontja. A több mint kétszáz éves módszeres kutatás sikerei ellenére az égés számos tisztázatlan kérdése foglalkoztatja ma is a kémikusokat. A modern égéskutatás kitüntetett fontosságú területe a szénhidrogének égésének vizsgálata, aminek jelentőségét önmagában az a számadat is mutatja, hogy napjainkban az évi 3,5 milliárd tonnát meghaladó mennyiségű feldolgozott kőolaj szénhidrogén-tartalmának több mint 90 %-át motorhajtó- illetve fűtőanyagként elégetik. Más természettudományokhoz hasonlóan az égéskutatásra is igaz, hogy a valaha elért eredmények döntő többsége a múlt század utolsó harmadától napjainkig született. Erre az időszakra jellemző az is, hogy a kémiai kutatás eszköztárában megjelentek a számítógépek, és egyfelől növekvő hatékonysággal segítették a kísérleti munkát a mérések tervezésétől az adatok feldolgozásáig, másfelől nélkülözhetelenné váltak az elméleti modellekkel végzett vizsgálatokban. A szénhidrogénekkel kapcsolatos égéskutatásban elsősorban az alábbi területeken bizonyult eredményesnek a számítógépes kémia<sup>1</sup> alkalmazása:

- a) A reagáló molekulák és gyökök szerkezetének, geometriájának és reakciókészségének kvantumkémiai számítása.
- b) Transzport- és termokémiai tulajdonságok számítása.
- c) A különböző összetételű szénhidrogén-oxigén elegyek reakciórendszereiben kialakuló koncentrációprofilok szimulációja és reakciómechanizmus-vizsgálata.
- d) Az áramlási viszonyok és az égéster-geometria hatásának vizsgálata.

A Kémia és Kémiai Informatika Tanszéken az a)–c) pontokban megjelölt területeken folyik eredményes kutatás. Jelen dolgozat a c) ponthoz, a szénhidrogének égése során keletkező termékek koncentrációjának időbeli és térbeli változásának számításához, ezen belül az égést kísérő koromképződés szimulációjához kapcsolódik.

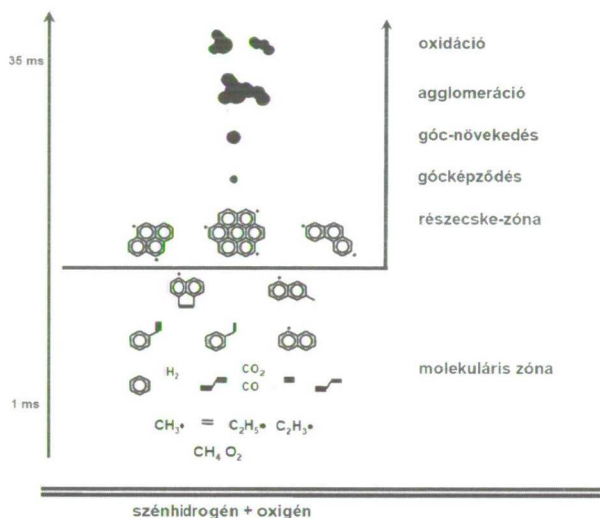
A szénhidrogének égését első közelítésben mint heves, robbanásszerűen lejártszódó, széndioxidot és vizet termelő reakciót szokás jellemezni. Ez a „tökéletes égés” azonban csak jelentős oxigénfelesleg alkalmazása esetén valósul meg, közönséges körülmények között a végtermékek között mindig megjelenik a korom, amely közismerten erősen mérgező, sőt rákkeltő anyag. A robbanómotorok (elsősorban a dízelmotorok) és égéstechnikai berendezések tervezői számára óriási kihívás, hogy eleget tegyenek a korombocskátást egyre szigorúbban korlátozó környezetvédelmi előírásoknak. (Érdemes megjegyezni, hogy a koromképződés gazdaságossági szempontból is káros, mivel a fenti eszközök hatásfokát csökkenti. Ugyanakkor a korom nélkülözhetetlen vegyipari alapanyag – főként a gumigyártásban –, és erre a célra kb. 800-féle kémiaiilag különböző koromféleség biztonságos előállításáról kell gondoskodni.) Ezek a szempontok önmagukban is indokolják a koromképződés iránt tapasztalható kutatói érdeklődést.

### A koromképződés modellezése

Ha számításainkban a koromképződést is figyelembe kívánjuk venni, rendkívül bonyolult feladatra vállalkozunk, mivel olyan modellt kell felállítanunk, amelynek segítségével leírhatjuk az égés részfolyamatait, a lángban jelenlevő, sokszor igen rövid élettartamú, a korom keletkezéséhez hozzájáruló anyagfajták sorsát is. Más

<sup>1</sup> C. K. Westbrook, Y. Mizobuchi, T. J. Poinso, P. J. Smith, J. Warnatz: Computational Combustion, *International Symposium on Combustion Chicago, IL, United States July 25, 2004 through July 30, (2004).*

szóval nagyszámú anyag között kémiai reakciók sokasága játszódik le abban az összetett folyamatban, melyben pl. a tiszta metán és oxigén molekuláinak kölcsönhatásától eljutunk a koromszemcsék kialakulásáig. A koromképződés egyik leghitelesebb leírását adja az általánosan – úgyszólván nem hivatalos szabványként – alkalmazott, Appel, Bockhorn és Frenklach által felállított ABF modell<sup>2</sup>, mely 101 anyagfajta 1038 reakciójával jellemzi a folyamatot. E modell részletes bemutatása helyett álljon itt egy, a koromrészecskék „evolúcióját” összefoglaló ábra<sup>3</sup>:



1. ábra

Az ábráról leolvasható, hogy a kismolekulájú szénhidrogének és az oxigén reakciójában ugyancsak kismolekulájú termékek ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , benzolszármazékok) mellett sokgyűrűs aromás szénhidrogén gyökök és molekulák is keletkeznek, melyek a koromképződés kiindulási anyagaiként („gócaiként”) viselkednek. Utóbbiak felületi növekedése illetve összekapcsolódása (agglomerációja) elvezet a mind nagyobb méretű koromszemcsék keletkezéséhez. A koromképződés modelljének ezeket a részfolyamatokat nyilvánvalóan kivétel nélkül tartalmaznia kell. A követelmény kézenfekvő, megvalósítása azonban több, nem utolsósorban matematikai természetű nehézségbe ütközik. E nehézségek egyike az, hogy míg a reakciórendszer kicsiny térfogatrészeiben az egyes kismolekulájú anyagok koncentrációját egy-egy számadattal meghatározhatjuk, addig a koromrészecskék jellemzéséhez a méreteloszlásukat kifejező teljes eloszlásfüggvény (*Particle Size Distribution* – PSD) ismerete szükséges. A kismolekulájú anyagok mérlegegyenletei – ha azokban a forrástág tömeghatástípusú sebességi kifejezés – könnyen automatizálható algoritmus szerint felírható differenciálegyenlet-rendszerek, melyek integrálása általában nem ütközik nehézségekbe. Végeredményben a kismolekulájú anyagok koncentrációidő függvényei megbízhatóan számíthatóak. Lényegesen körülményesebb a PSD-k időbeli változásának számítása. Az erre szolgáló legelterjedtebb módszerek a következők:

<sup>2</sup> J. Appel, H. Bockhorn and M. Frenklach: Kinetic Modeling of Soot Formation with Detailed Chemistry and Physics: Laminar Premixed Flames of  $C_2$  Hydrocarbons; *Combust. Flame* **121** 122–136 (2000).

<sup>3</sup> Soot Formation in Combustion: Mechanisms and Models, H. Bockhorn (Ed.), Springer-Verlag (1994).

- i) Sztochasztikus (Monte Carlo) szimuláció<sup>4,5,6,7</sup>.
- ii) A diszkrét Galerkin módszer<sup>8,9</sup>
- iii) Momentumok módszere

Az i) és ii) módszer matematikai értelemben rendkívül elegáns, közös hátrányuk azonban, hogy az ABF-hez hasonló részletességű modellek meghaladják teljesítőképességüket. A momentumok módszerének formalizmusa jól illeszthető a kismolekulájú anyagok mérlegegyenleteihez, bár a momentumegyenletek generálása az előbbieknél lényegesen bonyolultabb. Egyrészt a módszer alkalmazásának vannak elvi problémái: a törtrendű momentumok számítása, továbbá a 'closure problem' kérdése, azaz a momentumok egyenletei hogyan tehetők zárttá. E problémákat elsősorban Frenklach részletes vizsgálatai<sup>10,11,12</sup> nyomán a kvadratikus logaritmi-kus extrapoláció illetve interpoláció eszközével sikerült megoldani. További kényelmetlenség, hogy a momentumegyenletek generálása reakciótipusonként különböző algoritmust kíván<sup>13,14</sup>.

E szempontok magyarázzák, hogy míg a homogén reakciórendszerek modellezésére szolgáló univerzális programcsomagok széles választéka évtizedek óta elérhető, addig PSD-k számolására is alkalmas szoftvereket csak kivételképpen fejlesztettek. A Chemkin, a kinetikai programcsomagok vezető terméke is csak legutóbbi, 2006 őszén megjelent 4.1-es verziójában tartalmazza a PSD-k analízisét végző *Particle Tracking Module*-t. Ebből a legfrissebb változatból is hiányzik azonban egy fontos opció. A számolt momentumok ugyanis a legkevésbé sem szemléletesek, a momentumok önmagukban nem alkalmasak arra, hogy összevessük őket a kísérletileg mért méreteloszlás-függvényekkel, ami pedig természetes követelmény a modell érvényesítéséhez. Ezért elkerülhetetlen, hogy megpróbálkozzunk a PSD-k momentumaikból való rekonstrukciójával.

### PSD-k rekonstrukciója véges számú momentumuk felhasználásával

A feladat nehézségei és jelentősége egyaránt túlmutatnak a koromképződés témakörén. A normált PSD-k statisztikai értelemben az  $x$  részecskeméret sűrűségfüggvényei. Utóbbiakra a  $\bar{\varphi}(x)$  jelölést bevezetve a szokásos módon értelmezhetjük illetve közelíthetjük a PSD-k  $k$ -adik momentumát,  $\bar{\mu}^{(k)}$ -t:

$$\bar{\mu}^{(k)} = \sum_{\forall i} x_i^k p_i \approx \int_0^{\infty} x^k \bar{\varphi}(x) dx \quad (1)$$

ahol  $x_i$  az  $i$ -edik részecskeméret és  $p_i$  az  $x_i$  méretű részecskék előfordulásának relatív gyakorisága.

<sup>4</sup> P. Mitchell, M. Frenklach: Monte-Carlo Simulation of Soot Aggregation with Simultaneous Surface Growth – Why Primary Particles Appear Spherical; *Twenty-Seventh International Symposium on Combustion*, University of Colorado at Boulder August 2–7 (1998).

<sup>5</sup> M. Frenklach: Reaction mechanism of soot formation in flames; *Phys. Chem. Chem. Phys.* **4** 2028–2037 (2002).

<sup>6</sup> M. Balthasar, M. Kraft: A stochastic approach to calculate the particle size distribution function of soot particles in laminar premixed flames; *Combustion and Flame* **133** 289–298 (2003).

<sup>7</sup> M. Celnik, R. Patterson, M. Kraft, W. Wagner: Coupling a stochastic soot population balance to gas-phase chemistry using operator splitting; Preprint ISSN 1473 – 4273 (2006).

<sup>8</sup> M. Wulkow: The simulation of molecular weight distributions in polyreaction kinetics by discrete Galerkin methods; *Macromol. Theory Simul.* **5** 393–416 (1996).

<sup>9</sup> M. Balthasar, M. Frenklach: Modeling Soot Aggregate Formation in Premixed Laminar Flames; *Proceedings of the European Combustion Meeting* 2003.

<sup>10</sup> M. Frenklach: Dynamics of discrete distribution for Smoluchowski coagulation model; *Journal of Colloid and Interface Science* **108** 237–242 (1985).

<sup>11</sup> M. Frenklach, S. J. Harris: Aerosol dynamics modeling using the method of moments. *Journal of Colloid and Interface Science* **118** 252–261 (1987).

<sup>12</sup> M. Frenklach: Method of moments with interpolative closure; *Chemical Engineering Science* **57** 2229–2239 (2002).

<sup>13</sup> Marsi I.: Program Developments for Mechanistic Investigation of Polymer Degradation – Investigation of Chain-length-dependent Rate Equations; Engler-Bunte Institut, Karlsruhe, 2001. november 15.

<sup>14</sup> Marsi I.: Program Developments for Mechanistic Investigation of Polymer Degradation – Derivation of a New Generalized Formalism; Engler-Bunte Institut, 2001. november 22.

Elvben lehetséges, hogy eloszlásokat előírt pontossággal rekonstruáljunk momentumaikból. Ehhez bizonyos (a gyakorlatban szerencsére szinte mindig teljesülő) matematikai feltételek fennállása, illetve elegendően nagyszámú momentum ismerete szükséges. A konkrét számításokban azonban többnyire csupán az első néhány momentum áll rendelkezésre. (Előszórettel indulnak ki az első 4, 7 vagy 10 momentumból.) A rekonstrukcióba bevonható momentumokat differenciálegyenlet-rendszerek szimultán integrálásával kaphatjuk meg. E momentumok számának jelentős növelése nem is várható, mivel általában már az első és hetedik momentum különbsége meghaladja a 20 (!) nagyságrendet, és a még magasabb rendű momentumok egyidejű számítása miatt fellépő kerekítési hibák az alacsonyabb rendű momentumok megbízhatóságát elfogadhatatlannul rontják.

A rekonstrukcióhoz az első néhány momentum ismerete is elegendő, ha előzetes és független (*a priori*) információval rendelkezünk  $\tilde{\varphi}(x)$  matematikai alakjára vonatkozóan. Ebben az esetben a feladat a konkrét sűrűségfüggvény jellemző paramétereinek meghatározására egyszerűsödik. A valóságban azonban többnyire nincs ilyen információnk. A hiányt kivételes esetben a modell struktúrája pótolhatja: a kiindulási anyagok fogását és a termékek keletkezését leíró egyenletek és paramétereik – külön feltevések nélkül is – meghatározzák a PSD alakját<sup>10,15,16</sup>. Általában azonban csak azt tudhatjuk a PSD menetéről, amiről a momentumokból számolható jellemzők – a várható érték, szórás, ferdeség, lapultság – tájékoztatnak. Ilyen esetekben a keresett PSD előzetes azonosítása valamely konkrét sűrűségfüggvénnyel mindig bizonyos önkényességgel jár. Ezen eljárás alkalmazásának kockázatait szellemesen megkonstruált példákkal<sup>17</sup> illusztrálták, jóllehet, a közönséges modellek esetében is kaphatunk hamis megoldásokat. A leggyakrabban előforduló PSD-típusok (Gauss-, exponenciális, logaritmus normális, Poisson-, gamma-eloszlás) momentumaikból való rekonstrukcióságának feltételeit részletesen vizsgálták<sup>18</sup>.

### A Hosemann–Schramek eloszlás

Megállapíthatjuk, hogy minél flexibilisebb a választott sűrűségfüggvény, azaz paramétereinek értékeitől függően minél változatosabb alakot vehet fel, annál kisebb a választás bizonyos fokig önkényes volta által előidézett torzítás kockázata. Az előző bekezdésben felsorolt eloszlástípusokat flexibilitás tekintetében határozottan felülmúlja az eddig csak a polimerkémia bizonyos területein alkalmazott Hosemann–Schramek (HS) eloszlás<sup>19</sup>:

$$\tilde{\varphi}_{\text{HS}}(x) = \frac{ab \left(\frac{c+1}{a}\right) x^c \exp(-bx^a)}{\Gamma\left(\frac{c+1}{a}\right)} \quad (2)$$

(Az  $a = 1$  speciális esetben (2) a gamma-eloszlás sűrűségfüggvényével lesz azonos.)

A mondottak miatt a kitüntetett flexibilitás nyilvánvaló előnyökkel jár a koromképződés PSD-jeinek momentumaikból való rekonstrukciója során is. A HS-eloszlás rugalmasságát illusztrálja a szimmetrikus és aszimmetrikus eloszlás megbízható rekonstrukcióját bemutató 2. és 3. ábra:

\* A feltétel a  $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{E(r^k x^k)}{k!} = E(e^{-rx}) = g(t) \quad t \in [-1, 1]$  korlátossága, ahol  $E$  a várható érték képzésének szimbóluma.

<sup>15</sup> F. Mauss, T. Schäfer, H. Bockhorn: Inception and Growth of Soot Particles in Dependence on the Surrounding Gas Phase; *Combustion and Flame* **99** 697–705 (1994).

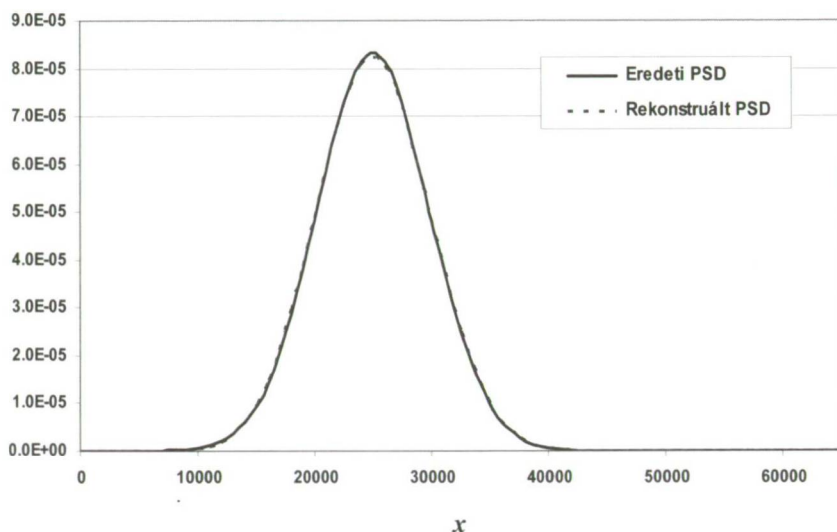
<sup>16</sup> F. Mauss, H. Bockhorn: Soot Formation in Premixed Hydrocarbon Flames: Prediction of Temperature and Pressure Dependence; *Z. Phys. Chem.* **188** 45–60 (1995).

<sup>17</sup> R. McGraw, S. Nemesure, S. E. Schwartz: Properties and evolution of aerosols with size distributions having identical moments; *Journal of Aerosol Science* **29**(7) 761–897 (1998)

<sup>18</sup> V. John, I. Angelov, A. A. Öncül, D. Thévenin: Techniques for the reconstruction of a distribution from a finite number of its moments; *Chemical Engineering Science* **62** 2890–2904 (2007).

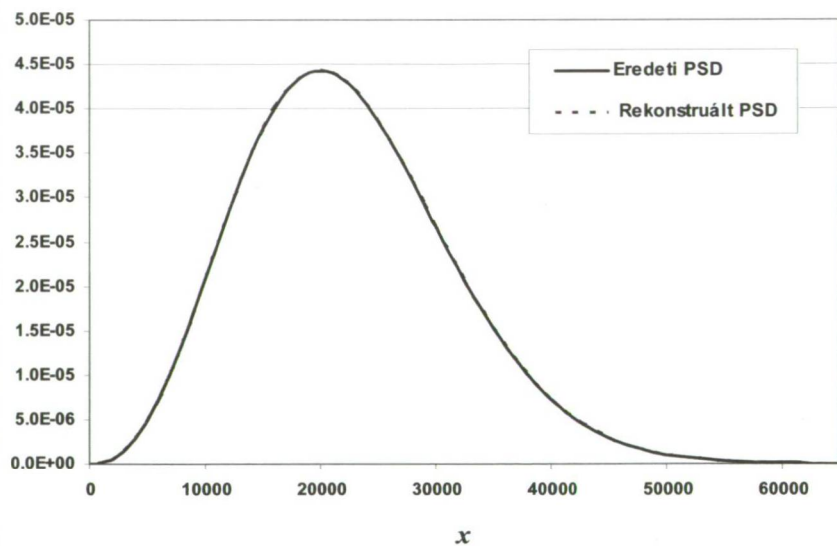
<sup>19</sup> M. D. Lechner, K. Gehrke, E. H. Nordmeier: Makromolekulare Chemie: ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker – p. 11; Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart (1993).

## Szimmetrikus eloszlás rekonstrukciója



2. ábra

## Aszimmetrikus eloszlás rekonstrukciója



3. ábra

A momentumokból való rekonstrukció gyakorlatilag tökéletesen visszaadja az eredeti eloszlásokat, legfeljebb a 2. ábra maximuma környékén válik el kissé az eredeti és a rekonstruált görbe lefutása.

Az eljárás eredményessége jelentős mértékben azon múlik, hogy az  $a$ ,  $b$  és  $c$  paraméterek meghatározásához sikerül-e megfelelő kezdetiértékeket találnunk. A tesztfutások azt mutatják, hogy az iteráció konvergenciáját az  $a_0 \approx 2$  és  $c_0 \approx 3$  választás biztosítja, amihez  $b_0$ -t  $\tilde{\mu}^{(1)}$ -ből a (3) képlet alapján számíthatjuk:

$$\tilde{\mu}^{(k)} = \frac{b^{\left(\frac{k}{a}\right)} \Gamma\left(\frac{c+k+1}{a}\right)}{\Gamma\left(\frac{c+1}{a}\right)} \quad (3)$$

A momentumokból számítható ferdeség ismerete azért is hasznos, mert ha a ferdeség erősen pozitív, a Hosemann–Schramek eloszlás helyett célszerűbb logaritmikus normális eloszlás típusú sűrűségfüggvényt választani a PSD rekonstrukciójához.

### Bimodális PSD-k rekonstrukciója

A rekonstrukciós feladat megoldása során a sűrűségfüggvény matematikai alakjának előzetes rögzítése az eloszlásra vonatkozó információ hiánya miatt bizonyos önkényességgel és ebből eredően torzítással járhat. Ez az esetleges torzítás nem feltétlenül csak abban mutatkozik meg, hogy a PSD pontjai a valóságoshoz képest kissé eltolódnak. Azt az alapvető kérdést is meg kell vizsgálnunk, hogy a PSD ténylegesen egy maximummal rendelkezik-e. A szakirodalomban ugyan gyakrabban számolnak be egymaximumú (unimodális), mint kétmaximumú (bimodális) PSD-kről, de az utóbbiak sem számítanak kivételnek<sup>20, 21, 22</sup>. A bimodalitás fellépésével elvben minden olyan rendszerben számolnunk kell, ahol több, egymással versengő, a részecskeméretet befolyásoló folyamat játszódik le, így pl. a törés-apritási<sup>23</sup> vagy a kristályosítási folyamatokban<sup>18</sup>. Az utóbbiak a jellegzetes gócképződés – gócnövekedés versengés miatt több hasonlóságot mutatnak a koromszemcsék kialakulásával, legalábbis a formális leírás tekintetében. A bimodális eloszlásokat többnyire megkísérik két unimodális eloszlás szuperpozíciójaként interpretálni. A momentumokból való rekonstrukció eredménye tehát két unimodális PSD lesz, melyek számítása azonban csak akkor végezhető el egymástól függetlenül, ha a PSD csúcsai tökéletesen elkülönülnek<sup>18</sup>. A koromképződés irodalmában ilyen esetről – tudomásunk szerint – még nem számoltak be, tehát a programfejlesztés során elsősorban a szimultán rekonstrukcióra kell felkészülnünk. Ésszerű feltevés, hogy a bimodális eloszlás két HS-eloszlás szuperpozíciójaként jön létre. Ha az összetevők  $\tilde{\varphi}_{\text{HS1}}$  és  $\tilde{\varphi}_{\text{HS2}}$ , melyek  $\beta/(1-\beta)$  arányban járulnak hozzá a  $\tilde{\varphi}$  eredő eloszláshoz, akkor felírhatjuk:

$$\tilde{\varphi}(x) = \beta \tilde{\varphi}_{\text{HS1}}(x) + (1-\beta) \tilde{\varphi}_{\text{HS2}}(x) \quad (4)$$

ahonnan a momentumok a következőképpen kaphatók meg:

$$\tilde{\mu}^{(k)}(x) = \beta \tilde{\mu}_{\text{HS1}}^{(k)}(x) + (1-\beta) \tilde{\mu}_{\text{HS2}}^{(k)}(x) \quad (5)$$

Ezzel a feladat 7 paraméter,  $a_1, b_1, c_1; a_2, b_2, c_2$  és  $\beta$  meghatározásaként fogalmazható meg, amihez a  $k = 1, \dots, 7$  momentumok ismerete szükséges.

A számításokat célszerű szegmentálni.  $\beta$  értékét a  $(0,1)$  intervallumon kell keresnünk. Rögzítsük előre  $\beta$ -t, majd oldjuk meg az (5) egyenletrendszert  $a_1, \dots, c_2$ -re  $k = 1, \dots, 6$  mellett. A kapott paraméterek felhasználásával számítsuk ki a 7. momentumot, és annak hibájától függően módosítsuk  $\beta$ -t és folytassuk – illetve megfelelő egyezés esetén tekintsük eredményesnek – az iterációt. Ha így járunk el, a számítási többlet nem nő jelentősen, viszont elkerülhetjük a több nagyságrenddel nagyobb 7. momentum együttes szerepeltetését a  $k = 1, \dots, 6$  momentumokkal az (5) egyenletrendszer numerikus megoldása során. Az eljárás természetesen mint speciális esetet felismeri és kezeli az unimodális eloszlásokat is, melyekre  $\beta \approx 0$ .

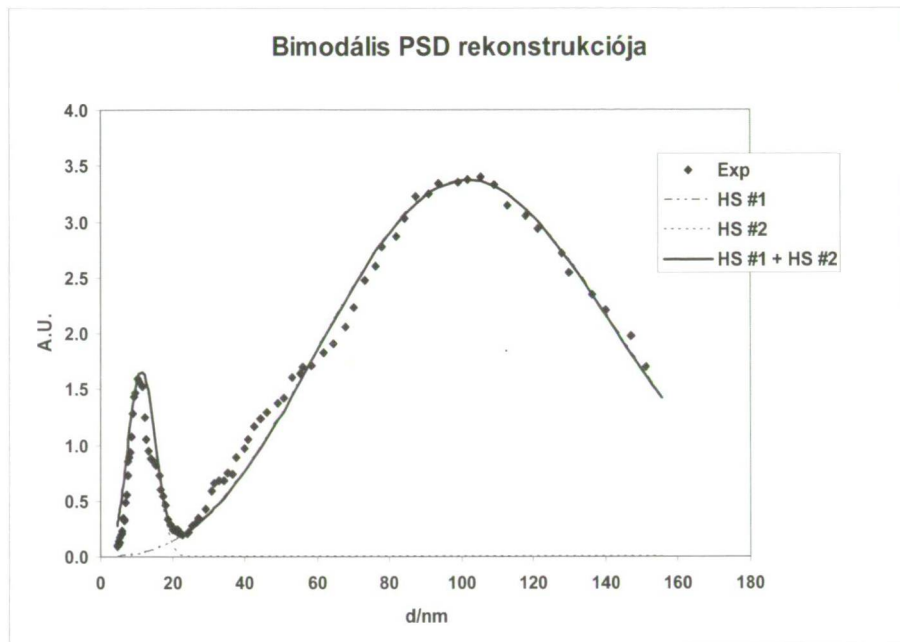
<sup>20</sup> M. M. Maricq, S. J. Harris, J. J. Szenté: Soot size distributions in rich premixed ethylene flames; *Combustion and Flame* **132** 328–342 (2003).

<sup>21</sup> J. Singh, R. I. A. Patterson, M. Kraft, H. Wang: Numerical simulation and sensitivity analysis of detailed soot particle size distribution in laminar premixed ethylene flames; *Combustion and Flame* **145** 117–127 (2006).

<sup>22</sup> K. Netzell, H. Lehtiniemi, F. Mauss: Calculating the soot particle size distribution function in turbulent diffusion flames using a sectional method; *Proceedings of the Combustion Institute* **31** 667–674 (2007).

<sup>23</sup> N. V. Mantzaris: Transient and asymptotic behaviour of the binary breakage problem; *J. Phys. A: Math. Gen.* **38** 5111–5132 (2005).

A 4. ábra egy kísérletileg, SMPS-technikával (*Scanning Mobility Particle Sizer*<sup>24</sup>) mért bimodális PSD<sup>25</sup> rekonstrukcióját mutatja be.



4. ábra

ISTVÁN MARS I

## Formation and processing of bimodal ash particle size distributions in the course of the burning of carbonhydrogens

Between 2002 and 2005, our department participated in the EU Program *Process-integrated thermic and chemical processing and reuse of electronic waste containing halogens*.

Our task was the development of a computer program for the modelling of heat disintegration of plastics. These processes have a lot in common with carbonhydrogen burning accompanied with ash formation. As a follow up to the project, we complemented the software so that it would be able to model burning processes.

This paper concerns the results we achieved in the field of the reconstruction of the ash-particles' particle-size distribution based on their momentums. Based on the experiment results, measured PSDs and calculated momentums we propose an approximation of the distributions based on the Hosemann-Schramek function. In addition, we explain an algorithm, with the help of which bimodal PSDs can be reliably divided up into Hosemann-Schramek distributions.

<sup>24</sup> Bin Zhao, Zhiwei Yang, Jinjin Wang, Murray V. Johnston, Hai Wang: Analysis of Soot Nanoparticles in a Laminar Premixed Ethylene Flame by Scanning Mobility Particle Sizer; *Aerosol Science and Technology* 37(8) 611–620 (2003).

<sup>25</sup> N. Orton, JoAnn Lighty, E. Eddings, A. Sarofim: Characterization of Young Soot from an Inverse Diffusion Flame; 2005 ACERC Conference; <http://www-acerc.byu.edu/News/Conference/2005/2005posters-ACERCNathanOrton%20poster.pdf>